Vol.13, No.1, Spring 2024, pp.133-150 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2023.79118.1287 Open access

Seismic Hazard Assessment of Badakhshan Region (Northeast Afghanistan)

Khadijah Mohammadi[a], Ebrahim Moghimi[b], Mehdi Zare[c], Mojtaba Yamani[d] *, Masoud Mojerab[e]

[a] *Ph.D in Geomorphological Hazards, Geography Colleg, University Of Tehran, Iran.*
[b] *Professor of Physical Geography,Geomorphology, Geography Colleg, University of Tehran, Iran.*
[c] *Professor of Eng Seismology IIEES, Tehran, Iran*
[d] *Professor in Geomorphology, Geography Colleg, University of Tehran, Iran.*
[e] *Assistant Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.*

Received: 17 November 2022 ***Revised: 14 January 2023*** ***Accepted: 17 May 2023***

Abstract

Badakhshan region, located in the northeast of Afghanistan, has a complex geology. A catalog from 2011-2021 was prepared using the data of the Middle Asia seismic catalog with updates (1909-2011) from the website of the American Geological Survey. Considering the last earthquake with a magnitude of 7.2 in 2015, the coefficients of b were calculated to the maximum value of 1.0 and the value of 7.9 on the surface and in the depth, the increase in the numerical values of *a* and *b* in the central half has been completely evident. The results indicated that the current trend is opposite to the direction of the main fault in North Badakhshan (north-south direction). The most frequent earthquakes M≥4 occurs at a depth of 150-70 km, earthquakes M≥5 at a depth of 150-300 km, and earthquakes ≥6 at a depth of 150-300 km occur in the east-west direction. This area is exactly where the Pamir Corridor plate meets the center of Badakhshan. This shows that at the end of the Pamir Corridor from east to west, ruptures are being created at depths of 0-150 km. Two east-west and east-south trends are evident. Regarding the shallow earthquakes related to the upper 50 km of the crust, the dominant mechanism is of the normal type, which indicates the stretching of the crust in this section. According to the deep mechanism of earthquakes, the direction of the tensile force is in the east-west direction. This issue further confirms the issue of continental collision and then subduction towards the south of Badakhshan. The innovation of this research is the identification of seismic trends that have rarely been researched in the studied area, and its application is identifying high-risk areas for construction.

Keywords: Hindu Kush, Morphotectonic, Fault, Badakhshan, Afghanistan

---

* . Corresponding author: Mojtaba Yamani Email: myamani@ut.ac.ir Tel:+989123197682

How to cite this Article: Mohammadi, K., Moghimi, E., Zare, M., Yamani, M., & Mojarab, M. (2024). Seismic Hazard Assessment of Badakhshan Region (Northeast Afghanistan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 133-150.
DOI: 10.22067/geoeh.2023.79118.1287

Geography and Environmental Hazards
Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79118.1287
جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شمارهٔ چهل و نهم، بهار ۱۴۰۳، صص ۱۵۰-۱۳۳

مقاله پژوهشی

ارزیابی خطر لرزه‌ای منطقه بدخشان (شمال شرق افغانستان)

خدیجه محمدی، دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
ابراهیم مقیمی، استاد ژئومورفولوژی و مخاطره شناسی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مهدی زارع، استاد زلزله‌شناسی مهندسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.
مجتبی یمانی[1]، استاد ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مسعود مجرب، استادیار مهندسی معدن، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۲/۲/۲۷

چکیده

منطقه بدخشان، در شمال شرق افغانستان دارای زمین‌شناسی پیچیده‌ای است. با استفاده از داده‌های کاتالوگ لرزه‌خیزی آسیای میانه با بروز رسانی (سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۰۹) از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا از سال ۲۰۱۱-۲۰۲۱ کاتالوگی تهیه گردید. با در نظر گرفتن آخرین زلزله با بزرگای ۷.۲ در سال ۲۰۱۵ ضرایب b به بیشترین مقدار ۱.۰ و a به مقدار ۷.۹ در سطح و عمق محاسبه گردید. افزایش مقادیر عددی a,b در نیمه مرکزی به‌طور کامل مشهود بوده است. نتایج حاکی از آن است روند حاضر، برخلاف راستای گسل اصلی شمال بدخشان (جهت شمالی- جنوبی) است. بیشترین فراوانی زلزله‌های ≤٤ در عمق ۷۰-۱۵۰ کیلومتر، زلزله‌های ≤٥ در عمق ۳۰۰-۱۵۰ کیلومتر و درنهایت زلزله‌های ≤٦ در عمق ۳۰۰-۱۵۰ کیلومتر در راستای شرقی غربی رخ می‌دهد. این منطقه دقیقاً برخورد صفحه دالان پامیر به مرکز بدخشان می‌باشد. این مهم

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۱۹۷٦۸۲ Email:myamani@ut.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

محمدی، خدیجه، مقیمی، ابراهیم، زارع، مهدی، یمانی، مجتبی، مجرب، مسعود؛ ۱۴۰۳. ارزیابی خطر لرزه‌ای منطقه بدخشان (شمال شرق افغانستان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳(۱). صص ۱۵۰-۱۳۳

https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79118.1287

نشان می‌دهد در منتهی الیه دالان پامیر از شرق به غرب گسیختگی‌هایی در عمق‌های ۰–۱۵۰ کیلومتر در حال ایجاد شدن هستند. دو روند شرقی–غربی و شرقی– جنوبی مشهود است. در خصوص زمین‌لرزه‌های کم‌عمق مربوط به ۵۰ کیلومتر بالایی پوسته، سازوکار غالب از نوع نرمال است که حکایت از کشش پوسته در این بخش دارد. جهت نیروی کششی با توجه به سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها، در امتداد شرقی–غربی است. همین مسئله، موضوع برخورد قاره‌ای و سپس فرورانش به سمت جنوب بدخشان را بیشتر تأیید می‌کند. نوآوری این پژوهش شناسایی روندهای لرزه‌ای است که در منطقه موردمطالعه به‌ندرت تحقیق شده است و کاربرد آن برای شناسایی نواحی پرخطر جهت ساخت‌وسازها می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: هندوکش، مورفوتکتونیک، بدخشان، افغانستان.

۱– مقدمه

به دلیل برخورد قاره به قاره رشته‌کوه‌های هندوکش و پامیر، گسل، درزه و چین‌خوردگی، فشار و کشش در این منطقه رخ داده است؛ در نتیجه ساختار زمین‌شناسی در منطقه بدخشان پیچیده است و شکل‌گیری آن از کامبرین تا هولوسن است (ژانگ[1] و همکاران، ۲۰۱۵). کانون‌های لرزه‌ای در هندوکش شرقی در جنوب بدخشان بیشتر است (ساریکایا، ۲۰۱۲؛ شرودر[2]، ۲۰۱۲). منطقه پامیر–هندوکش یکی از فعال‌ترین مناطق روی کره زمین با لرزه‌خیزی و تغییر شکل بزرگ است و چشم‌اندازی برای ارزیابی برخورد قاره‌ای مرتبط با دو ناحیه فرورانش درون‌قاره‌ای با جهت‌های مختلف را نشان می‌دهد. داده‌های لرزه‌خیزی و توموگرافی لرزه‌ای یک دال شکل فرورانش شیب‌دار به سمت شمال در زیر هندوکش و دال فرورانش جنوب در زیر پامیر را نشان می‌دهد (یانگ[3] و همکاران، ۲۰۲۲). نقشه لرزه‌خیزی منطقه نیز با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری تهیه شده از منابع مختلف تهیه شده است. لرزه‌خیزی در این منطقه الگوی مشخصی را نشان می‌دهد. (شهزاد[4] و همکاران، ۲۰۰۸). دو ناحیه لرزه‌خیز متمایز، اولی روند شیب‌دار در زیر هندوکش و دیگری گسترده در زیر پامیر می‌باشد. زمین‌لرزه‌های عمیق و متوسط عمدتاً در منطقه هندوکش توزیع می‌شوند که توسط گسل رانشی کنترل می‌شود، درحالی‌که پامیر تحت سلطه رژیم تنش امتداد لغز با زمین‌لرزه‌های کم‌عمق و متوسط است. منطقه‌ای که حداکثر محور تنش اصلی در جنوب پامیر عمودی است، درواقع دو سیستم فرورانش؛ که یک سیستم فرورانش دو طرفه است در منطقه هندوکش رخ داده است؛ فرورانش به سمت شمال صفحه هند

1 Zhang
2 Shroder
3 Yang
4 Shahzad

و فرورانش منطقه پامیر به سمت جنوب صفحه اوراسیا است. یک گسل احتمالی در منطقه بین هندوکش و پامیر استنباط می‌شود که جهت حرکت مخالف صفحات هند و اوراسیا دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۲۲). کاتالوگی با گردآوری داده‌های مرکز لرزه‌نگاری بین‌المللی از ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۵ و سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده ۲۰۰٦ تا ۲۰۱۷ تهیه شد. این مطالعه نشان داده است که در طول دوره قبل از سال ۱۹٦۰، کاتالوگ‌ها ناقص بوده‌اند (رحمان و همکاران، ۲۰۲۱). ۱۹ ایستگاه جدید ماهواره‌ی ناوبری جهانی بین سال‌های ۲۰۱٤ و ۲۰۲۰ را در هندوکش (شمال شرقی افغانستان)، بعد از زلزله ۲۰۱۵ نصب شد. احتمال زلزله‌ای با بزرگای ٦.٤ در سال ۲۰۱٦ را بررسی شد (متزگر[1] و همکاران، ۲۰۲۱). بر اساس کاتالوگ زلزله به روز شده و همگن متشکل از ۲۹۰۹۷ رویداد 4< است. در پژوهشی از مدل پیش‌بینی حرکت زمین برای زلزله‌های کم‌عمق و عمیق استفاده شده است (واسیم[2] و همکاران، ۲۰۱۹). هدف از این پژوهش تهیه کاتالوگ لرزه‌خیزی از سال ۱۹۰۹–۲۰۲۱ میلادی، پهنه‌بندی مناطق پرخطر لرزه‌ای، سازوکار ژرفی زمین‌لرزه و تحلیل مناطق پرخطر می‌باشد.

۲- مواد و روش مطالعه

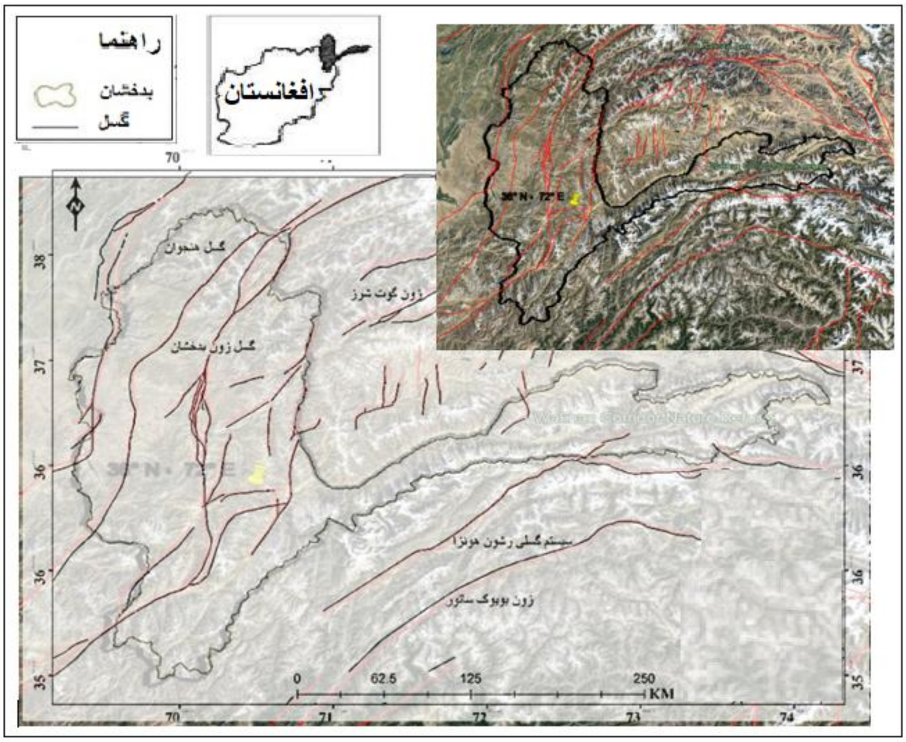
در این پژوهش، کلیه زمین‌لرزه‌های تاریخی و زمین‌لرزه‌های دستگاهی به همراه سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌هایی که در ارتباط با بدخشان به وقوع پیوسته‌اند، موردبررسی قرار گرفته است. داده‌های تاریخی از گزارش‌ها و کتاب تاریخی فیض محمد کاتب که در دیگر کاتالوگ‌ها آورده نشده بود و داده‌های تاریخی از مقالات امبرسیس گردآوری شد. همچنین داده‌های لرزه‌ای دستگاهی موردنیاز مطالعه، از کاتالوگ لرزه‌خیزی آسیای میانه[3] با بروز رسانی (سال‌های ۲۰۱۱–۲۰۲۱) از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دیگر مراجع معتبر جهانی حاصل گردید. در بخش لرزه‌زمین‌ساخت به ترتیب درباره پیشینه منطقه بررسی‌هایی انجام شد و نتیجه‌ای که به دست آمد، ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساخت بدخشان را نشان داد. نرم‌افزارهای مورداستفاده در این مطالعه: EZ frisk، گلوبال مپر[4]، جی آی اس می‌باشد. در ابتدا داده‌های لرزه‌خیزی دستگاهی توسط فرمول‌های مربوطه یکسان‌سازی شد. بدین معنا که بزرگاهای مورد تأیید هر سازمان و سایت همه به بزرگاهای Mw تبدیل شد، سپس برای مدل شدن وارد نرم‌افزار EZ frisk شدند. در مرحله بعد توسط، گلوبال مپر و جی آی اس به نقشه تبدیل شدند. درنهایت ضمن پایش کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مرتبط با بدخشان، به تعیین الگوی تغییرات ضرایب لرزه‌خیزی گوتنبرگ–ریشتر شامل a,b پرداخته شده و سعی شد تا نقشه‌های هم پتانسیل این دو متغیر مهم و کلیدی تهیه گردد.

1 Metzger
2 Waseem
3 EMME
4 Global mapper

۳- موقعیت منطقه موردمطالعه

بدخشان یکی از استان‌های شمال شرقی افغانستان که در منطقه کوهستانی هندوکوش (لوک[1] و همکاران، ۱۹۹۵؛ ملورس[2] و همکاران، ۱۹۹۵) و پامیر (کوفنر[3] و همکاران، ۲۰۲۱) و بین طول جغرافیایی ۷۰ درجه و ٤ دقیقه و ۳٦ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳٦ درجه و ۵۰ دقیقه و ۱٦ ثانیه شمالی واقع شده است (شکل ۱)، از سطح دریا ۱۸۰۰ متر ارتفاع دارد (گوربونووروا[4] و همکاران، ۲۰۲۲). این استان در ٤۷۰ کیلومتری کابل واقع است. مساحت بدخشان بیش از ٤۷،٤۰۳ کیلومترمربع می‌باشد. حجم رسوبات کواترنری کم و عمدتاً محدود به بستر رودخانه‌هاست (دروززیزو[5] و همکاران ۲۰۰٦). ارتفاعات غالباً از مجموعه سنگ‌های آهکی، دولومیتی و در برخی موارد مجموعه سنگ‌هایی با درجه دگرگونی بالا چون گنیس تشکیل شده است. در منابع مختلف زون‌های تکتونیکی مختلف برای افغانستان در نظر گرفته شده ولی آنچه نظر نویسندگان را جلب کرد عبارتند از: ۱: زون‌های بند امیر۲: سوخاب ۳: بدخشان غربی ٤: بدخشان شرقی و٦: زون نورستان می‌باشد (متزگر[6]، 2020). زمین‌شناسی بدخشان از لحاظ ساختمانی بسیار درهم‌تنیده است و اساساً شامل توالی‌هایی از روندهای باریک سرزمین‌های شمال‌شرقی جنوب‌غربی خرده‌های قاره‌ای، به سن پالئوزویک تا ترشیری می‌باشد. از لحاظ تشکیلات زمین‌شناسی، در بدخشان سنگ‌هایی به سن پرکامبرین تا کوارترنری و در نقاط مختلف جغرافیایی با سن و جنس متفاوت به‌چشم می‌خورد. همچنین در کوه‌های هندوکش رسوبات یخچالی دوران چهارم نیز به چشم می‌خورد.

1 Lukk
2 Mellors
3 Kufner
4 Gorbunova
5 Darvoziev
6 Metzger



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و گسل‌های اصلی گستره موردمطالعه پژوهش

٤- یافته‌های تحقیق

در این بخش به بحث در مورد روش و نتایج در منطقه موردنظر پرداخته شده است.

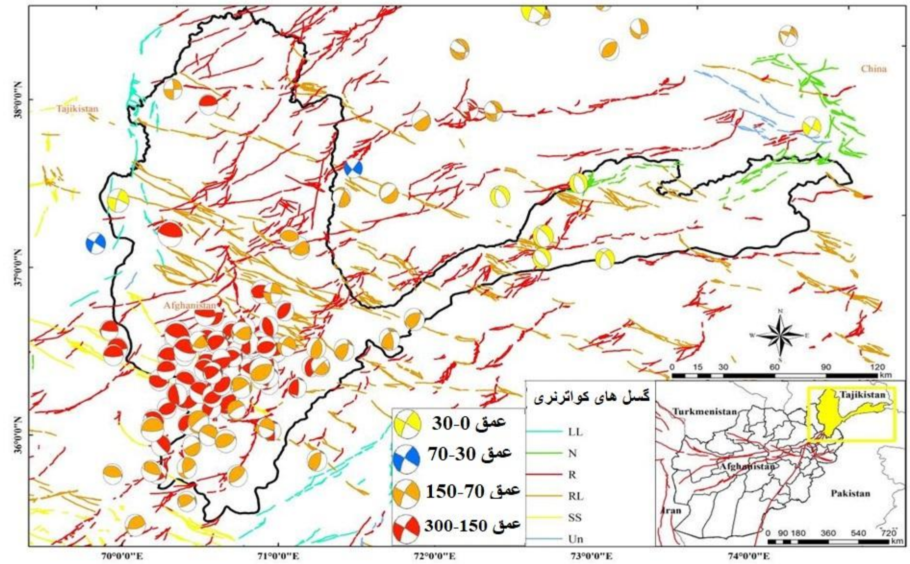
۱-٤- ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌های منطقه

همان‌طور که جدول ۱ طبقه‌بندی و پراکندگی رخدادهای با بزرگای ٤–۸ در عمق‌های ۰–۷۰، ۷۰–۳۰۰ و ۳۰۰–۷۰۰ کیلومتر، نشان می‌دهد؛ می‌توان اطلاعات شکل ۱ را که در رابطه با زون لرزه‌خیز بدخشان است این‌طور تحلیل کرد:

جدول ۱- طبقه‌بندی و پراکندگی رخدادهای با بزرگای ٤-۸ در عمق‌های ۰-۷۰، ۷۰-۳۰۰ و ۳۰۰-۷۰۰ کیلومتر

ردیف	بزرگا (Mw)	عمق (KM)	فراوانی	ردیف	بزرگا (Mw)	عمق (KM)	فراوانی
1	4≤4.5	0-70	1599	5	6 ≤6.5	0-70	16
		70-300	3749			70-300	50
		300-700	6			300-700	0
2	4.5≤ 5	0-70	1154	6	6.5 ≤7	0-70	5
		70-300	1782			70-300	13
		300-700	1			300-700	0
3	5≤ 5.5	0-70	286	7	7 ≤7.5	0-70	2
		70-300	306			70-300	7
		300-700	2			300-700	0
4	5.5 ≤ 6	0-70	94	8	7.5≤8	0-70	1
		70-300	98			70-300	4
		300-700	0			300-700	1

کانون‌های بین اعماق ۱۵۰-۳۰۰ کیلومتر (روند سبز رنگ) و کانون‌های اعماق ۱۵۰-۷۰ کیلومتر (روند سبز آبی)، را می‌توان به‌عنوان لایه لرزه‌زا در نظر گرفت. در خط کنیک رشته‌کوه‌های پامیر و هندوکش مخروط افکنه‌هایی از نوع فعال دیده می‌شود. این مخروط افکنه‌ها در واقع مسیر بستر رودخانه‌های جوانی می‌باشد که به علت تأثیر تکتونیک فعال منطقه، در میان مخروط افکنه‌های قدیمی حفر شده است. البته اقلیم مرطوب منطقه از یک‌سو و نرخ بالای فرسایش و حمل توسط رودخانه‌های منطقه از سوی دیگر، سبب انتقال رسوبات کواترنر به دیگر مناطق پست شده تا مخروط افکنه‌ها در آن مناطق تشکیل شوند. ازاین‌رو مساحت تحت پوشش رسوبات کواترنری در این منطقه از درصد بسیار پایینی برخوردار است. در (شکل۲) به‌روشنی می‌توان مشاهده نمود که محدوده‌ای که کانون تجمع زمین‌لرزه‌ها معرفی شده بود، دارای سازوکار غالب معکوس است که عمق میانگین آن‌ها حدفاصل ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر می‌باشد. زمین‌لرزه‌های ۷۰ تا ۱۵۰ کیلومتری، به شکل یک نوار با امتداد شمال شرق جنوب قرب در جنوب بخش پر تراکم به چشم می‌خورد. در خصوص زمین‌لرزه‌های کم‌عمق مربوط به ۳۰ کیلومتر بالایی پوسته، سازوکار غالب از نوع نرمال است. چنین سازوکاری حکایت از کشش پوسته در این بخش دارد. جهت نیروی کششی به توجه به سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها، در امتداد شرقی-غربی است. همین مسئله، موضوع فرورانش را بیشتر تأیید می‌کند.

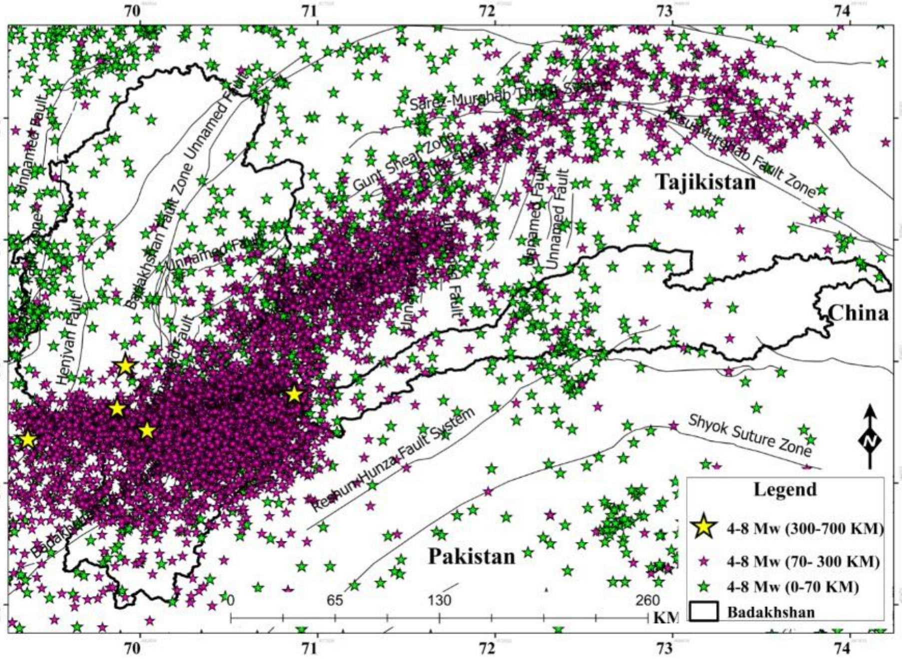


شکل ۲- نقشه سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌های گستره موردمطالعه به تفکیک عمق

۲-٤- کاتالوگ لرزه‌خیزی و روند زلزله‌ها

اکثر زمین‌لرزه‌هایی که پس از قرن ۱۹ در گستره منطقه موردمطالعه روی داده‌اند دارای بزرگای کم ولی پراکندگی زیاد که در عمق‌های زیاد تا ۲۷۰ کیلومتری می‌باشند. در این پژوهش سعی شده است که زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای M≤٤ معرفی شوند. با توجه به شکل ۳، و مشاهده پراکندگی زمین‌لرزه‌ها در گستره منطقه موردمطالعه متوجه تمرکز کانون‌های زلزله در مخالف راستا و جهت گسل اصلی چمن و شمال بدخشان (امتداد شمالی- جنوبی) در جبهه کوهستان پامیر–هندوکش خواهیم شد. منطقه پامیر – هندوکش در منطقه فعال و زلزله‌خیز قرار دارد. درحالی‌که تحقیقات زیادی در زمینه تولید کاتالوگ‌های لرزه‌ای (دانکیو[1] و همکاران، ۲۰۱۸) در این منطقه ادامه دارد، با این وجود تفسیر کاتالوگ‌ها با استفاده از معیارهای مختلف و با ویژگی‌های مختلف هنوز ناقص است (رحمان و همکاران). گزارش‌های مکتوب زمین‌لرزه‌های تاریخی (امبرسیس[2] و بیلهام[3]، ۲۰۱۱؛ بیلهام و امبرسیس، ۲۰۰۵)، افغانستان از ۷۳٤ میلادی تا به امروز کاتالوگی بیش از ۱۳۰۰ زمین‌لرزه در افغانستان را شرح می‌دهد که بیشتر در منطقه بدخشان رخ داده‌اند. با توجه به کاتالوگ لرزه‌خیزی آسیای میانه (۲۰۱۱- ۱۹۰۹)، با به‌روزرسانی ۲۰۱۱–۲۰۲۱، در نقشه زیر نشان داده شده است. طبق شکل لرزه‌خیزی منطقه روندی شمال شرقی- جنوب غربی دارد که در همین راستا بیشترین فراوانی زلزله‌هایی با M≤٤ را داراست.

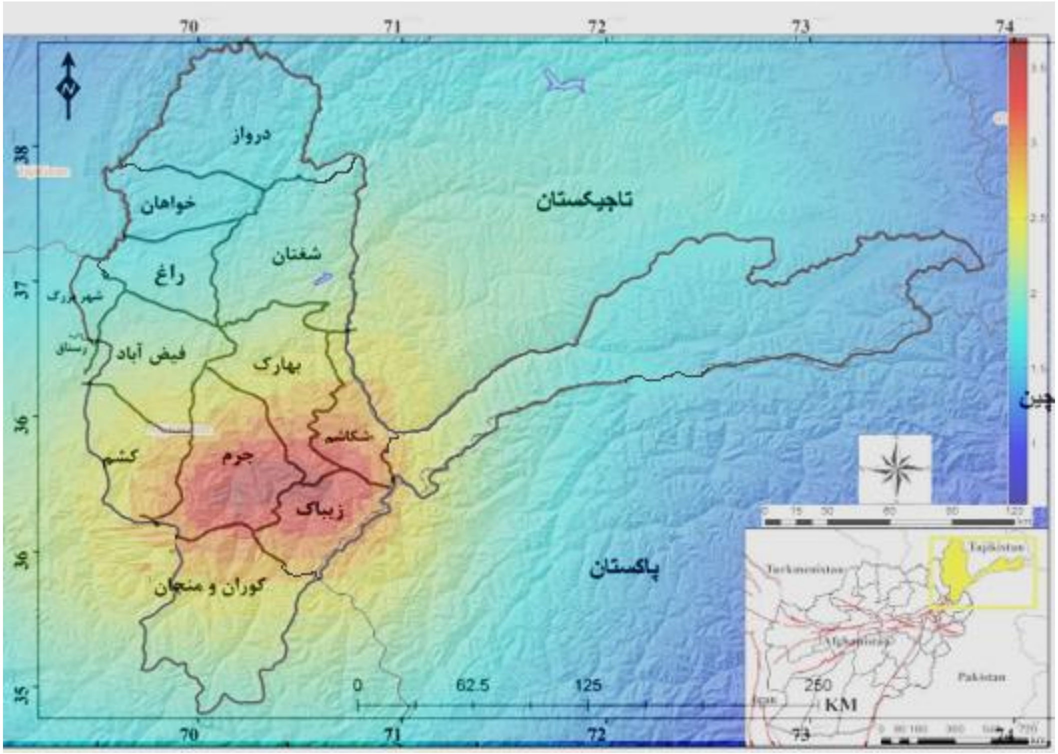
1 Danciu
2 Ambraseys
3 Bilham



شکل ۳- پراکندگی رخدادهای با بزرگای ٤-۸ در عمق‌های ۰-۷۰، ۷۰-۳۰۰ و ۳۰۰-۷۰۰ کیلومتر (سازمان زمین‌شناسی آمریکا)

۳-٤- چگالی زمین‌لرزه‌ها و پهنه‌بندی خطر شهرستان

به‌منظور تهیه نقشه چگالی زمین‌لرزه‌های منطقه قبل و پس از رویداد ۲۰۱۵، (در حدود ۷۰ کیلومتری مرکز بدخشان و عمق ۲۰۰ کیلومتری هندوکش)، فهرست زمین‌لرزه‌های گستره موردمطالعه در نرم‌افزار ZMap مورد پردازش قرار گرفته و درنهایت نتایج حاصل در (شکل ٤) نشان داده شده است. چگالی زمین‌لرزه‌ها برحسب تابع‌نمایی از تعداد رویداد در هر کیلومترمربع لحاظ شده است. بیشترین فراوانی زمین‌لرزه‌ها مربوط به انتهای دالان پامیر و صفحه بدخشان جنوبی می‌باشد. پایین بودن میزان چگالی زمین‌لرزه‌ها پیش از رویداد ۲۰۱۵ در بخش جنوب شرقی گسل به‌طور کامل مشهود است. این متغیر پس از رویداد ۲۰۱۵ به سطح بالاتری رسیده است. افزایش این متغیر رابطه مشخصی با بخش جنوب شرقی بدخشان از خود نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن چنین الگویی انتظار می‌رود زمین‌لرزه‌های بیشتری در بخش جنوب و جنوب شرقی منطقه در آینده به وقوع بپیوندد تا توازن میان‌چگالی زمین‌لرزه‌ها در هر دو بخش شمال غربی و جنوب شرقی برقرار گردد.



شکل ٤- چگالی زمین‌لرزه‌ها و پهنه‌بندی خطر برای شهرستان‌های گستره موردمطالعه

با توجه به موقعیت قرارگیری شهرستان‌های بدخشان و چگالی لرزه‌خیزی طبقه‌بندی و پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای (گیاردینی[1] و همکاران، ۲۰۱۸؛ کامرانزاد و همکاران، ۲۰۲۰) منطقه به‌صورت زیر می‌باشد: الف: با خطر خیلی زیاد (جرم، زیباک، اشکاشم)؛ ب: با خطر زیاد (کشم، کوران و منجان، بهارک، فیض آباد)؛ ج: با خطر متوسط (رستاق، شهر بزرگ، راغ، شغنان، واخان)؛ د: با خطر کم (خواهان، درواز).

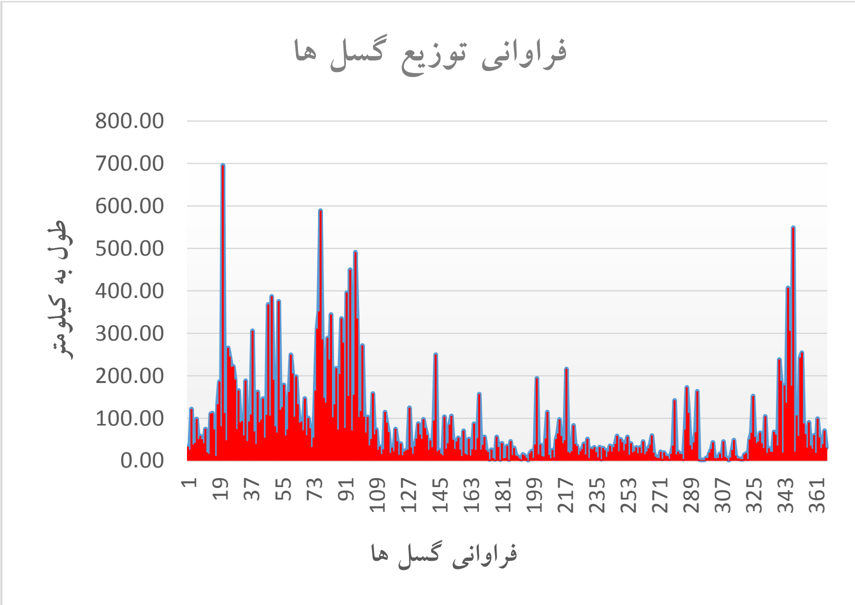
1 Giardini

جدول ۱- فراوانی و عمق بزرگاهای ٤–۸ (۱۹۰۹–۲۰۲۱)، سازمان زمین‌شناسی آمریکا[1]

کل	بزرگا (Mw)										
	۸–۷.۵	۷.۵–۷	۷–٦.۵	٦.۵–٦	٦–۵.۵	۵.۵–۵	۵–٤.۵	٤.۵–٤			
۲۰۰۱	۰	۲	٤	۱۳	٦۷	۳۷٦	۱۱۷٦	۳٦۳	تعداد	۵۰–۰	عمق (کیلومتر)
٪۲۵.۷	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۱	٪۰.۲	٪۰.۹	٪٤.۸	٪۱۵.۱	٪٤.۷	درصد		
۱۱۰۰	۰	۱	۰	۱	۲۲	۱۸۵	٦۸۲	۲۰۹	تعداد	۱۰۰–۵۰	
٪۱٤.۱	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۳	٪۲.٤	٪۸.۸	٪۲.۷	درصد		
۱۹.٤۸	۰	۰	۱	۰.۱۱	۰.۲٤	۲.٤۲	۱۲.۳۵	٤.۳۵	تعداد	۱۵۰–۱۰۰	
٪۲۵.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۱	٪۰.۳	٪۳.۱	٪۱۵.۸	٪۵.٦	درصد		
۱۲.۵۰	۱	۰	۲	٦	۱۸	۱۱۱	۷۸۲	۳۳۰	تعداد	۲۰۰–۱۵۰	
٪۱٦.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۱	٪۰.۲	٪۱.٤	٪۱۰.۰	٪٤.۲	درصد		
۱٤.۰۸	۱	۵	۷	۲۳	۳۵	۱٦٦	۸۲۱	۳۵۰	تعداد	۲۵۰–۲۰۰	
٪۱۸.۱	٪۰.۰	٪۰.۱	٪۰.۱	٪۰.۳	٪۰.٤	٪۲.۱	٪۱۰.۵	٪٤.۵	درصد		
۰.۷۹	۰	۰	۰	۱	.۲۰	۰.٦	۰.٤۸	۰.۲۲	تعداد	۳۰۰–۲۵۰	
٪۱.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۱	٪۰.٦	٪۰.۳	درصد		
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۲	تعداد	۳۵۰–۳۰۰	
٪۰.۱	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	درصد		
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	تعداد	٤۰۰–۳۵۰	
٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	درصد		
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	تعداد	٤۵۰–٤۰۰	
٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۰	درصد		
۷۷.۹۳	۲	۸	۰.۱٤	۰.۵۵	۱.٦۸	۱۰.۸۸	٤۷.٤۷	۱۷.۱۱	تعداد	کل	
٪۱۰۰.۰	٪۰.۰	٪۰.۱	٪۰.۲	٪۰.۷	٪۲.۲	٪۱٤.۰	٪٦۰.۹	٪۲۲.۰	درصد		

1 USGS

در جدول۱ طبقه‌بندی عمق و بزرگا آورده شده است. بزرگا به ۸ کلاس و عمق به ۹ کلاس طبقه‌بندی شده است. در عمق ۰–۵۰ کیلومتر بیشترین میزان مربوط به زلزله‌های با بزرگای ٤.۵–۵، ۱۵٪بوده است. همچنین در عمق ۰–۵۰ زلزله‌ها۵۰ ۲۵.۷ درصد، عمق ۵۰–۱۰۰ زلزله‌ها ۱٤.۱ درصد، در عمق ۱۵۰ تا ۱۰۰ زلزله‌ها ۲۵ درصد، در عمق ۱۵۰–۲۰۰ زلزله‌ها ۱٦ درصد، در عمق ۲۰۰–۲۵۰ زلزله‌ها ۱۸.۱ درصد، در عمق ۲۵۰–۳۰۰ زلزله‌ها ۱۰ درصد، در عمق ۳۰۰–۳۵۰ زلزله‌ها ۰.۱ درصد، در عمق ۳۵۰–٤۰۰ زلزله‌ها ۰ درصد می‌باشد.



شکل ۵- فراوانی توزیع گسل‌های منطقه

در شکل ۵، گسل‌های با طول ۱۵–۱۱۳ کیلومتر بیشترین فراوانی و گسل‌های ۱۸۳–۳۲۸ کیلومتر کمترین فراوانی را نشان می‌دهد. فراوانی گسل‌های با طول زیاد بین ۳۳۰–۳۵۰ نیز جز گسل‌های طویل می‌باشد.

٤-٤- متغیر لرزه‌خیزی a و b در سطح

ضرایب لرزه‌خیزی a,b که به ضرایب گوتنبرگ-ریشتر معروف هستند (نکراسووا[1] و همکاران، ۲۰۲۲)، از عوامل کلیدی در تعیین میزان و موقعیت تنش در یک منطقه به شمار می‌روند (چن[2] و همکاران، ۲۰۲۲). به همین منظور نقشه هم پتانسیل این دو متغیر در سطح زمین ترسیم شد. اگر استان بدخشان را به دو منطقه

1 Nekrasova
2 Chen

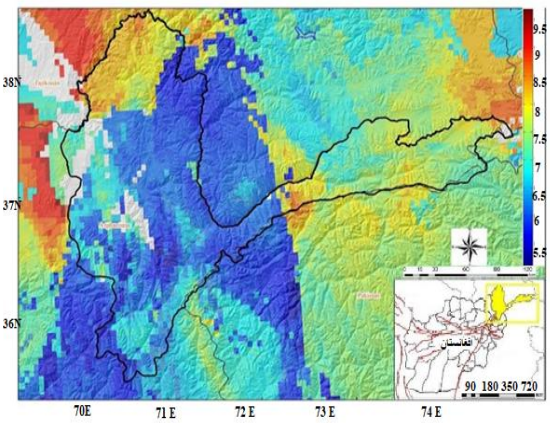
شمالی و جنوبی تقسیم کنیم، این میزان برای متغیر b در نیمه شمالی به بیشترین مقدار ۱.۰ و در نیمه جنوبی نیز تا ۷.۹ می‌رسد. افزایش مقادیر عددی a,b در نیمه مرکزی و جنوبی پس از رویداد ۲۰۱۵ به‌طور کامل مشهود است. همچنان که قبلاً گفته شد انتظار می‌رود در آینده، وقوع زمین‌لرزه‌ها در نیمه جنوبی بدخشان سبب بالا رفتن مقادیر مذکور گردد.

٥-٤- متغیر لرزه‌خیزی a و b در عمق

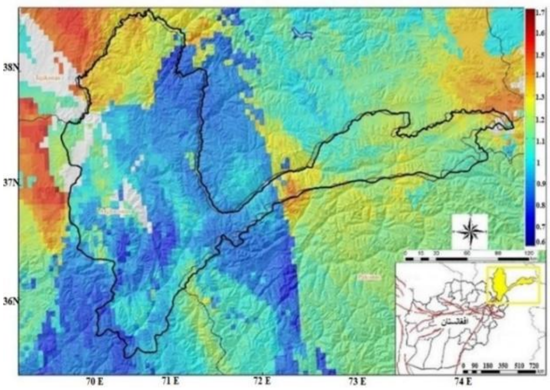
ضمن تحلیل فهرست زمین‌لرزه‌های گستره موردمطالعه پیش از رویداد ۲۰۱۵، مقادیر عددی a,b برای نیمه جنوبی گسل تقریباً صفر است؛ اما پس از رویداد ۲۰۱۵ زمین‌لرزه مذکور، این مقادیر برای نیمه شمالی گسل در بخش کم‌عمق تا حد زیادی افزایش یافته است؛ اما بخش‌های عمیق‌تر در نیمه شمال غربی، نواحی جنوب شرقی کم‌عمق و عمیق، از مقادیر عددی a,b پایینی برخوردارند و به همین سبب می‌توان پیش‌بینی نمود که مکان وقوع زمین‌لرزه آتی در همین بخش‌ها باشد.

زلزله‌های به وقوع پیوسته اخیر افغانستان نشان می‌دهند بسیاری از مناطق در این کشور تحت تنش‌های تکتونیکی فعال هستند و امکان وقوع زلزله در هر ناحیه وجود دارد. بررسی امکان وقوع زلزله در سال‌های اخیر با روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ای صورت گرفته ولی در برخی موارد روش‌های مختلف دیگری نیز ارائه شده‌اند که بر پایه تغییرات پارامترهای فیزیکی قبل از وقوع زلزله استوار هستند.

الگوهای عمق لرزه‌خیزی برای ترسیم مرزهای صفحه لرزه زمین ساختی بالقوه و شبکه گسلی مرتبط در مناطق درون صفحه‌ای آن‌ها قابل‌توجه است. تغییرات در ویژگی‌های لرزه‌خیزی با تغییرات مقدار b برای عمق تفکیک شده درک می‌شود. لرزه‌خیزی بین‌صفحه‌ای در خوشه‌های مختلف از اعماق کانونی کم‌عمق تا نیمه عمیق مشاهده می‌شود که منعکس‌کننده مناطق فعال لرزه‌ای لبه صفحه مربوطه است.



شکل ٦- پراکندگی ضریب لرزه‌خیزی a



شکل ۷- پراکندگی ضریب لرزه‌خیزی b

در تحقیقات متعددی نشان داده شده است که برخی پارامترها نظیر گرانش محلی (لی[1] و همکاران، ۲۰۲۲)، میدان مغناطیسی محلی (چتینا[2] و همکاران، ۲۰۲۲)، سطح آب زیرزمینی (نوسووا[3]، ۲۰۲۲، اسیم[4] و همکاران، 2022)، دمای آب زیر زمینی (احمد[5] و همکاران، ۲۰۲۲)، و مقاومت الکتریکی خاک قبل از وقوع زلزله دچار تغییر می‌شوند. علاوه بر این تحقیقات بسیاری به کمک تحلیل‌های آماری در راستای کسب اطلاعات مناسب از خطرات زلزله انجام یافته است (اسیم و همکاران، ۲۰۲۲، کاریچ[6] و همکاران، ۱۹۹۲). یکی از پارامترهای لرزه‌ای مهم در زمینه تحلیل خطر و برآورد احتمال وقوع زلزله پارامتر b رابطه گوتنبرگ-ریشتر می‌باشد (کورب، ۲۰۲۲). پارامتر b با سطح تنش منطقه رابطه دارد به‌طوری‌که با افزایش تنش در منطقه مقدار پارامتر b کاهش می‌یابد (بوفه[7]، ۱۹۷۰، کوزین[8]، ۱۹۸۸). برخی معتقدند که می‌توان از پارامتر b به‌عنوان شناساگر تنش در یک منطقه استفاده کرد (جکسون و مکنزی[9]، ۲۰۰۷). ازآنجایی‌که سطح تنش در منطقه با گذشت زمان تغییر می‌کند. می‌توان گفت که پارامتر b تابع زمان بوده و با گذشت آن تغییر می‌نماید. کاهش پارامتر b با زمان می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت تحلیل خطر وقوع زلزله در یک بازه زمانی خاص مورداستفاده قرار گیرد (نووانین[10] و همکاران، ۲۰۰۵). تغییرات پارامتر b در مناطق پر تنش بخصوص قبل از وقوع زلزله‌های سهمگین بارها موردبررسی قرار گرفته است. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهند که این پارامتر در مناطق پر تنش قبل از وقوع زلزله کاهش می‌یابد و این کاهش تا زمان وقوع زلزله ادامه دارد (گوتنبرگ[11]، ۱۹٤۷). افزایش دقت محاسبات در محاسبه‌ی پارامتر b نیازمند در دسترس بودن اطلاعات اولیه مناسب و کامل است که اصطلاحاً با لفظ غنی بودن کاتالوگ لرزه‌ای بیان می‌شود (پاچکو، ۱۹۹۲). درصورتی‌که تمام رخدادهای لرزه‌ای یک منطقه توسط سیستم‌های اندازه‌گیری کننده ثبت شوند و تعداد این رخدادها در حد مطلوبی باشد، می‌توان کاتالوگ را کامل در نظر گرفت. معمولاً هراندازه که دقت محاسبات پارامتر b بیشتر باشد می‌توان گفت که کاتالوگ دریک منطقه کامل بوده و نتایج نهایی قابل‌اطمینان‌تر می‌باشد. پس از تحلیل فهرست زمین‌لرزه‌های گستره موردمطالعه در نرم‌افزار Zmap، نقشه هم پتانسیل متغیر a,b در سطح زمین ترسیم شده است (شکل٦). در دو منطقه یکی در محل انحنای شرقی بدخشان و دیگری در نیمه شرقی غربی، مقادیر عددی a,b به نسبت بالا هستند (شکل‌های۷ و ٦). این میزان برای متغیر b در بخش اول

1 Li
2 Chetia
3 Nosova
4 Asim
5 Ahmad
6 Kariche
7 Bufe
8 Scholz
9 McKenzie
10 Nuannin
11 Gutenberg

به بیشترین مقدار ۱/۰ و در بخش دوم نیز تا ۰/۰۱ می‌رسد. در خصوص متغیر a نیز این مقادیر ۷.۹ و ٦.۹ هستند. افزایش مقادیر عددی a,b در نیمه مرکزی گسل (منطقه بدخشان) پس از رویداد ۲۰۱۵ به‌طور کامل مشهود است. انتظار می‌رود در آینده، وقوع زمین‌لرزه‌ها در نیمه شرقی و جنوب شرقی و جنوب غربی و جنوب بدخشان، سبب بالا رفتن مقادیر مذکور گردد. گفتنی است افزایش این دو متغیر در گوشه جنوبی منطقه موردمطالعه، در ارتباط با زمین‌لرزه‌های گسل نوزاد می‌باشد که پس از سال ۲۰۱۵ به وقوع پیوسته‌اند. اصل کلی که در مورد مناطقی با تکتونیک فعال وجود دارد، این است که اگر مقادیر a و b پایین باشند، در چنین مناطقی استعداد لرزه‌خیزی بالاست. با این مفهوم که می‌توان انتظار وقوع زمین‌لرزه آتی را در این مناطق داشت. در واقع استعداد لرزه‌خیزی و به‌بیان‌دیگر مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های آتی، هدف اصلی بوده است؛ اما هر نظریه‌ای هرچند اثبات شده، نیازمند بررسی و واکاوی در دیگر مناطق است. به همین رو رویداد مهیب سال ۲۰۱۵ با بزرگای ۷.۲ به‌عنوان ملاک صحت سنجی، مدنظر قرار گرفت. در چنین شرایطی ابتدا تمامی تحلیل‌ها از سال ۱۹۰۹ تا پیش از وقوع رویداد ۲۰۱۵ انجام گرفت. انتظار این است که طبق نظریه پیش اشاره، زمین‌لرزه بعدی در یکی از موقعیت‌های پیش‌بینی شده به وقوع بپیوندد. به همین رو همان تحلیل‌ها برای سال‌های ۱۹۰۹ تا ۲۰۲۱ انجام گرفت و این بار نیز مناطق مستعد رویداد آتی شناسایی و معرفی شدند. اگر رویداد ۲۰۱۵ در یکی از مناطق بخش اول مطالعات قرار بگیرد، این نظریه در مورد منطقه بدخشان قابل استناد خواهد بود.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش گسل‌ها و فوکال مکانیسم ژرفای کانونی مشخص شد که مناطق مرکزی دارای مکانیسم غالب نرمال و شیب‌لغز بوده و بر اساس چگالی زمین‌لرزه و موقعیت شهرستان‌های جرم، زیباک و اشکاشم دارای بیشترین چگالی و جزو بیشترین خطر لرزه‌خیزی و آسیب می‌باشد. ضرایب a,b مقدار بالا و بزرگای زیاد را کم نشان داد. بزرگا و عمق به طبقاتی تقسیم شده که طبقات ۰–۵۰، ۱۰۰–۱۵۰ و ۲۰۰–۲۵۰ به ترتیب با درصدهای ۲۵.۷، ۲۵ و ۱۸.۱ در طبقه بزرگای ٤.۵–۵ ریشتر به دست آمد.

زمین‌لرزه‌ها در پامیر و بدخشان به‌گونه‌ای تقسیم‌شده‌اند که گویا در این پهنه ٤٤.۰۵۹ کیلومترمربعی، بیش از ده بلوک تکتونیکی و شکستگی وجود دارد. با توجه به روند کانون زلزله‌های تاریخی و دستگاهی از سال ۱۹۰۹–۲۰۲۱ دو روند مشهود در عمق‌های کم، متوسط و زیاد ایجاد شده است. درواقع برخلاف راستا و جهت گسل اصلی شمال بدخشان (شمالی- جنوبی). بیشترین فراوانی زلزله‌های ≤٤ و عمق ۷۰–۱۵۰ کیلومتر، زلزله‌های ≤۵ و عمق ۳۰۰–۱۵۰ کیلومتر و درنهایت زلزله‌های ≤٦ در عمق ۳۰۰–۱۵۰ کیلومتر در راستا و جهت شرقی غربی رخ می‌دهد. این منطقه دقیقاً محل فرورفتن صفحه دالان پامیر به سمت غرب و

جنوب غرب بدخشان به دلیل فشارهای صفحه هند می‌باشد. نقشه‌های خطر لرزه‌ای شهوار و همکاران، ۲۰۱۳؛ کریمی پری داری و همکاران، ۲۰۱۳؛ زارع و همکاران، ۲۰۱۴، می‌توان به نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای بلوچ[۱] و همکاران۲۰۲۱، کایلا[۲] و همکاران؛ ۱۹۷۲؛ کوفنر[۳]، ۲۰۲۱، روپرت[۴] و همکاران ۲۰۰۷ در کاتالوگ لرزه‌خیزی از همین روش استفاده کرده و این ادعا را تأیید کرده‌اند. که تهیه کردند. این مهم نشان می‌دهد که در منتهی‌الیه دالان پامیر از شرق به غرب و جنوب گسیختگی‌هایی در عمق‌های ۰–۱۵۰ کیلومتر در حال ایجاد شدن هستند. درواقع دو روند مشهود شرقی–غربی، شرقی– جنوب غربی را نشان می‌دهد. حرکت کانون سطحی زمین‌لرزه‌های مرتبط با بدخشان از سال ۱۹۰۹–۲۰۲۱ از شرق به غرب به‌طور کامل مشخص می‌باشد. درنهایت مناطق لرزه‌خیز و مستعد لرزه‌ای آینده را در بخش جنوب شرقی منطقه پیش‌بینی می‌شود.

کتابنامه

- Ahmad, Z., Ali, Z., Ghani, F., & Khalid, S.,2022. Regeneration of Natural Forests in the Hindu Kush Range: A Case Study of Quercus baloot Plants in Sheshikoh Oak Forests, District Chitral, Pakistan. International Journal of Forestry Research, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/2173092.

Ambraseys, N., & Bilham, R.,2011. Corruption kills. Nature, 469(7329), 153-155. http://dx.doi.org/10.1038/469153a.

- Asim, K. M., Schorlemmer, D., Hainzl, S., Iturrieta, P., Savran, W. H., Bayona, J. A., & Werner, M. J.,2022. Multi- Resolution Grids in Earthquake Forecasting: The Quadtree Approach. Bulletin of the Seismological Society of America. https://doi.org/10.1785/0120220028.
- Bilham, R., & Ambraseys, N.,2005. Apparent Himalayan slip deficit from the summation of seismic moments for Himalayan earthquakes, 1500–2000. Current science, 1658-1663. https://www.semanticscholar.org/paper/Apparent-Himalayan-slip-deficit-from-the-summation-Bilham-Ambraseys/76faa0b9039fe001e04c58f4753ed2f53becfbeb.
- Bishop, M. P., James, L. A., Shroder Jr, J. F., & Walsh, S. J.,2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. Geomorphology, 137(1), 5-26. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.027.
- Bufe, C. G.,1970. Frequency-magnitude variations during the 1970 Danville earthquake swarm. Earthquake Notes, 41(3), 3-7. https://doi.org/10.1080/00288306.1973.10425384.
- Chen, X., Xiang, N., Guan, Z., & Li, J.,2022. Seismic vulnerability assessment of tall pier bridges under mainshock-aftershock-like earthquake sequences using vector-valued intensity measure. Engineering Structures, 253, 113732. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113732.
- Chetia, T., Baruah, S., Dey, C., Baruah, S., & Sharma, S.,2022. Seismic induced soil gas radon anomalies observed at multiparametric geophysical observatory, Tezpur (Eastern Himalaya), India: an appraisal of probable earthquake forecasting model based on peak radon

1 Bloch
2 Kaila
3 Kufner
4 Sippl

anomalies. Natural Hazards, 111(3), 3071-3098. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11069-021-05168-9.
- Danciu, L., Şeşetyan, K., Demircioglu, M., Gülen, L., Zare, M., Basili, R., ... & Giardini, D.,2018. The 2014 earthquake model of the Middle East: seismogenic sources. Bulletin of Earthquake Engineering , 16 (8), 3465-3496. https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-017-0096-8.
- Darvoziev, M.,2006. Short essay of woody and brushwood plants of the basin of Yazgulom River (mountainous Badakhshan. Vestnik Natsionalnogo Universiteta, 5(31), 160-177. https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=38094056.
- Giardini, D., Danciu, L., Erdik, M., Şeşetyan, K., Demircioğlu Tümsa, MB, Akkar, S., ... & Zare, M.,2018. Seismic hazard map of the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering , 16 (8), 3567-3570. http://dx.doi.org/10.1007/s10518-018-0347-3.
- Gorbunova, E. M., Batukhtin, I. V., Besedina, A. N., & Petukhova, S. M.,2022. Hydrogeological Responses of Fluid-Saturated Collectors to Remote Earthquakes. In Processes in GeoMedia—Volume IV (pp. 203-214. Springer, Cham. https://doi.org/10.3390/w15071322.
- Gutenberg, B.,1947. Microseisms and weather forecasting. Journal of Atmospheric Sciences, 4(1), 21-28. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004%3C0021:MAWF%3E2.0.CO;2.
- Kaila, K. L., Gaur, V. K., & Narain, H.,1972. Quantitative seismicity maps of India. Bulletin of the Seismological Society of America , 62 (5), 1119-1132. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1979.tb06766.x.
- Kamranzad, F., Memarian, H., & Zare, M.,2020. Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(7), 430. https://doi.org/10.3390/ijgi9070430.
- Kariche, J.,2022. Role of fluid on earthquake occurrence: Example of the 2019 Ridgecrest and the 1997, 2009 and 2016 Central Apennines sequences. http://dx.doi.org/10.31223/X5MH1J.
- Karimiparidari, S., Zaré, M., Memarian, H., & Kijko, A.,2013. Iranian earthquakes, a uniform catalog with moment magnitudes. Journal of Seismology , 17 (3), 897-911. http://dx.doi.org/10.1007/s10950-013-9360-9.
- Korb, C. A., Elbaz, H., Schuster, A. K., Nickels, S., Ponto, K. A., Schulz, A., ... & Pfeiffer, N.,2022. Five-year cumulative incidence and progression of age-related macular degeneration: results from the German population-based Gutenberg Health Study (GHS). Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, 260(1), 55-64. https://doi.org/10.1007/s00417-021-05312-y.
- Kozin, F.,1988. Autoregressive moving average models of earthquake records. Probabilistic Engineering Mechanics, 3(2), 58-63. https://doi.org/10.1016/0266-8920(88)90016-1.
- Kufner, S. K., Kakar, N., Bezada, M., Bloch, W., Metzger, S., Yuan, X., ... & Schurr, B.,2021. The Hindu Kush slab break-off is revealed by deep structure and crustal deformation. Nature communications, 12(1), 1-11. https://www.nature.com/articles/s41467-021-21760-w.
- Li, C., Peng, Z., Yao, D., Meng, X., & Zhai, Q.,2022. Temporal changes of seismicity in Salton Sea Geothermal Field due to distant earthquakes and geothermal productions. Geophysical Journal International, 232(1), 287-299. https://doi.org/10.1093/gji/ggac324.
- Lukk, A. A., Yunga, S. L., Shevchenko, V. I., & Hamburger, M. W.,1995. Earthquake focal mechanisms, deformation state, and seismotectonics of the Pamir- Tien Shan region, Central Asia. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B10), 20321-20343. http://dx.doi.org/10.1029/95JB02158.

- McKenzie, J., & Moorey, P. R. S.,2007. The Architecture of Alexandria and Egypt, c. 300 BC to AD 700 (Vol. 63). New Haven: Yale University Press. https://archive.org/details/judith-mc-kenzie-the-architecture-of-alexandria-and-egypt-c.-300-b.-c.-to-a.-d.-
- Mellors, R. J., Pavlis, G. L., Hamburger, M. W., Al- Shukri, H. J., & Lukk, A. A.,1995. Evidence for a high- velocity slab associated with the Hindu Kush seismic zone. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B3), 4067-4078. https://doi.org/10.1029/94JB02642.
- Metzger, S., Ischuk, A., Deng, Z., Ratschbacher, L., Perry, M., Kufner, S. K., ... & Moreno, M.,2020. Dense GNSS profiles across the northwestern tip of the India- Asia collision zone: Triggered slip and westward flow of the Peter the First Range, Pamir, into the Tajik Depression. Tectonics, 39(2), e2019TC005797. https://doi.org/10.1029/2019TC005797.
- Metzger, S., Kakar, N., Zubovich, A., Borisov, M., Saif, S., Panjsheri, A. H., Rahmani, J. R., Zaryab, M. Y., Rezai, M. T., Deng, Z., Bendick, R., Kufner, S.-K., Okoev, J.,2021): Survey mode GNSS data, acquired 2014-2019 in the Afghan Hindu Kush and across northern Pamir margin, Central Asia. https://doi.org/10.5880/GFZ.4.1.2021.003.
- Nekrasova, A., & Kossobokov, V.,2022. The Lake Baikal Unified Scaling Law for Earthquake Regional Coefficients. In Problems of Geocosmos–2020 (pp. 253-261). Springer, Cham. http://dx.doi.org/10.1134/S1069351320010097.
- Nosova, A. A., Kopylova, M. G., Lebedeva, N. M., Larionova, Y. O., Kargin, A. V., Sazonova, L. V., ... & Kovach, V. P.,2022. Melt sources for alkaline carbonate-bearing rocks of the Terskiy Coast (Kola Alkaline Carbonatitic Province). Chemical Geology, 121267.
- Nuannin, P., Kulhanek, O., & Persson, L.,2005. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. Geophysical research letters, 32(11). https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2005GeoRL..3211307N/doi:10.1029/2005GL022679.
- Pacheco, J. F., & Sykes, L. R.,1992. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1909 to 1989. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(3), 1306-1349. https://doi.org/10.1785/BSSA0820031306.
- Rahman, Z., Rehman, K., Ali, W., Ali, A., Burton, P., Barkat, A., ... & Qadri, S. M.,2021. Re-appraisal of earthquake catalog in the Pamir—Hindu Kush region, emphasizing the early and modern instrumental earthquake events. Journal of Seismology, 25(6), 1461-1481. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2021JSeis..25.1461R/doi:10.1007/s10950-021-10046-9.
- Ruppert, N. A., Lees, J. M., Kozyreva, N. P., & Eichelberger, J.,2007. Seismicity, earthquakes and structure along the Alaska-Aleutian and Kamchatka-Kurile subduction zones: A review. GEOPHYSICAL MONOGRAPH-AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 172, 129. http://dx.doi.org/10.1029/172GM12.
- Sarikaya, M. A., Bishop, M. P., Shroder, J. F., & Olsenholler, J. A.,2012. Space-based observations of Eastern Hindu Kush glaciers between 1976 and 2007, Afghanistan and Pakistan. Remote sensing letters, 3(1), 77-84. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.536181.
- Shahvar, M. P., Zare, M., & Castellaro, S.,2013. A unified seismic catalog for the Iranian plateau (1909–2011). Seismological Research Letters, 84 (2), 233-249. http://dx.doi.org/10.1785/0220130084.
- Shahzad, F., Mahmood, S. A., & Gloaguen, R.,2008, November. Remote sensing analysis of ongoing deformation in Hazara Kashmir Syntaxis in Northern Pakistan. In 2008 Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/USEREST.2008.4740350.

- Shroder, J. F.,2012. Afghanistan: rich resource base and existing environmental despoliation. Environmental Earth Sciences, 67(7), 1971-1986. DOI: 10.1007/s12665-012-1638-7.
- Waseem, M., Lateef, A., Ahmad, I., Khan, S., & Ahmed, W.,2019. Seismic hazard assessment of Afghanistan. Journal of Seismology, 23(2), 217-242. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s10950-018-9802-5.
- Yang, Y., Zeng, Z., King, S. D., & Shuang, X.,2022. Double-sided subduction with contrasting polarities beneath the Pamir-Hindu Kush: Evidence from focal mechanism solutions and stress field inversion. Geoscience Frontiers, 13(4), 101399. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101399.
- Zare, M., Amini, H., Yazdi, P., Sesetyan, K., Demircioglu, MB, Kalafat, D., ... & Tsereteli, N.,2014. Recent developments of the Middle East catalog. Journal of Seismology, 18 (4), 749-772. http://dx.doi.org/10.1007/s10950-014-9444-1.
- Zhang, X., Zhang, Q., Zhang, Z., Chen, Y., Xie, Z., Wei, J., & Zhou, Z.,2015. Rechargeable Li–CO 2 batteries with carbon nanotubes as air cathodes. Chemical Communications, 51(78), 14636-14639. DOI: 10.1002/adma.201700396.